

EFFECTOS PRODUCIDOS EN LOS LAGOS DE TRISTAINA POR UN ALUD DE NIEVE ACONTECIDO EL 1 DE FEBRERO DE 2001, PRINCIPAT D'ANDORRA (PIRINEOS ORIENTALES)

Valentí TURU⁽¹⁾ y Marcel URIGÜEN⁽²⁾

⁽¹⁾ DRYAS®, Av. Príncep Benlloch 66-72, despatx 308, Andorra la Vella, Principat d'Andorra, vturu@andorra.ad

⁽²⁾ ORDINO-ARCALÍS, Camp de neu, Ordino, Principat d'Andorra, marcel@infor.net.ad

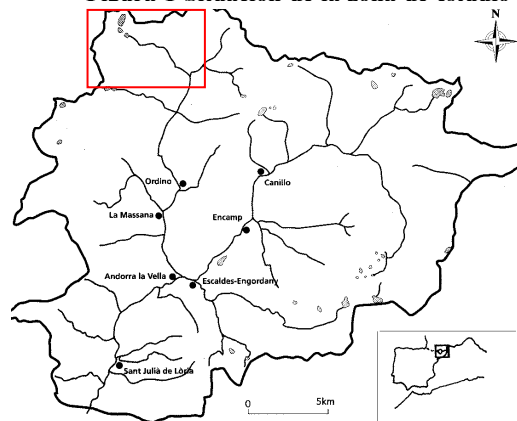
Keywords: Snow avalanche, impact power, water wave, velocity flow, water and snow flood, Pyrenees, Andorra

Abstract: A snow avalanche impact against a frozen lake can produce a water wave that overflow the lake and produced an important water flow into Tristaina river. We concluded that the maximal wave in the lake has 0,1 Hz, an λ of 20 meters, a velocity of 2 m/s and an amplitude of 3 meters high. The maximal flooding volume was about 30 m³/s in a river that the normal flow is about 10 l/s: The flow acquired an maximal velocity of 86 Km/h in a waterfall and the impact has a power of 9200 kW.

INTRODUCCIÓN

El circo de Tristaina, está situado en el extremo NW del Principado de Andorra, en la cabecera de la "Vall d'Ordino". Junto con la Coma del Forat y Arcalís, forman el grupo de cuencas donde nace el río Valira del Nord. El circo de Tristaina está compuesto por tres lagos (*estanys*) escalonados que ocupan unas cubetas de sobreexcavación glaciar. El más elevado de estos lagos (≈ 2300 m), "l'Estany de Més Amunt" de Tristaina es también el de mayor extensión (12,8 Ha). El punto más elevado de este circo es el Pic de Tristaina de 2878 m. Vecina al circo de Tristaina se halla la estación de esquí: Camp de Neu Ordino-Arcalís y está emplazada en una zona con cierto riesgo de avalanchas, por lo que los especialistas del servicio de pistas proceden de forma sistemática a desencadenar preventivamente aludes, hecho que propicia su observación.

Figura 1-Situación de la zona de estudio



EL EVENTO

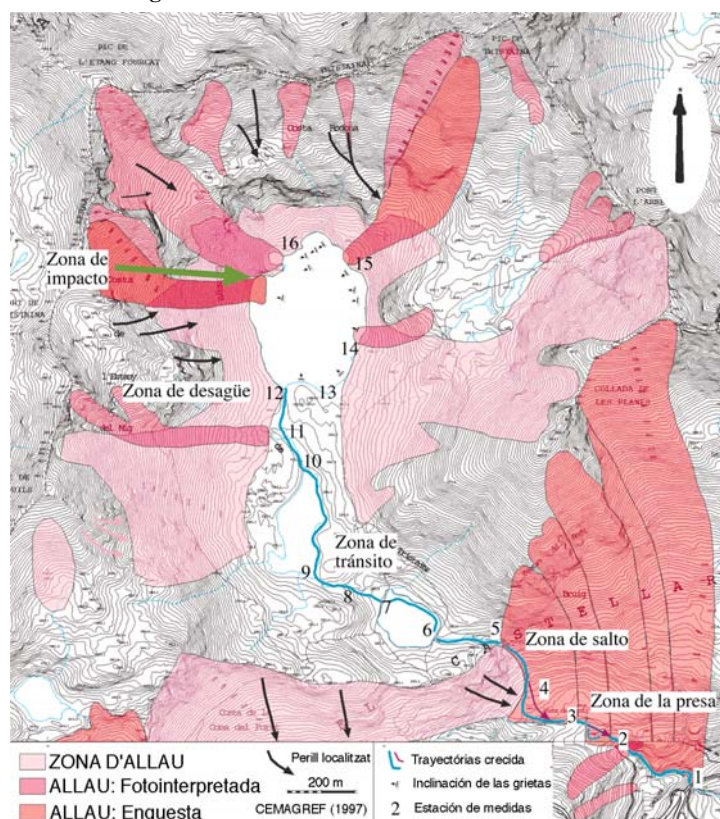
Durante los últimos días de enero del 2001 se produjeron importantes precipitaciones de nieve acompañadas de viento de N. (día 29, 43 cm; día 30, 52 cm; día 31, 13 cm), que obligaron a efectuar intervenciones en algunas zonas de avalancha. La madrugada del 1 de febrero llegó a la base de la estación un equipo de pistemos, que posteriormente cuando clareó el día, prosiguieron hacia los puntos de tiro con una máquina pisanieves. La visibilidad era escasa debido a la fuerte ventisca que elevaba la nieve recién caída. (*Esa noche, se registraron 40 cm en la estación que provocaron acumulaciones de más de 150 cm debidas al transporte por el viento.*) Pese a la poca visibilidad observaron un exagerado caudal en el río de Tristaina, que normalmente, en esta época del año suele ser bastante modesto. Más arriba, a la salida de la cubeta glaciar, las aguas del primer lago mostraban las trazas del desbordamiento del río. Considerando que este aumento anormal del

caudal sólo pudo ser debido a un aporte de agua extraordinario por parte de los lagos, y teniendo en cuenta las importantes acumulaciones de nieve y placas de viento depositadas en las vertientes S, la hipótesis más probable en un primer momento fue que el desencadenamiento de una avalancha rompió la capa de hielo de alguno de los lagos, penetrando bajo la superficie y el volumen de la masa nivosa habría hecho rebosar parte del agua contenida. Efectivamente, aprovechando una mejora de las condiciones meteorológicas, se pudo observar un corte en el manto nival de 40-80 cm de grosor, que recorría las vertientes S y E del circo de Tristaina, alcanzando una longitud estimada de 1550 m, que indica el límite superior de la placa desprendida. Ésta era presente en muchos tramos rozando la cresta y en otros seguía la base de las barreras rocosas más elevadas, pero su continuidad se prolongaba en casi la totalidad de su longitud. La observación de este corte, teniendo en cuenta la morfología del área afectada, nos lleva a la conclusión de que probablemente se produjo una sola avalancha, con lo que todo el manto nivoso de las dos vertientes se deslizó, unos 400 m más abajo, hasta “l’Estany de Més Amunt” de Tristaina. La talla excepcional de la avalancha, concentrada principalmente en la cabecera del lago; la gran velocidad alcanzada por el frente de alud y la incidencia del impacto, son factores determinantes de la consecución del fenómeno. Normalmente la capa de hielo que recubre estos lagos, es lo suficientemente resistente como para soportar el impacto de los aludes que se producen en esta zona. Probablemente, las elevadas temperaturas registradas al inicio de esta temporada de invierno y las heladas tardías, también han retardado la formación de la capa de hielo, o en todo caso, ésta no alcanzó el grosor y la resistencia suficientes.

EFFECTOS OBSERVADOS

Los efectos del impacto del alud sobre “l’Estany de Més Amunt” y del desbordamiento del mismo se han podido observar durante toda la temporada. Se distingue por un lado la zona de impacto (Estany de Més Amunt) y por otro lado la zona por donde ha circulado la avenida de agua, distinguiéndose un zona de tránsito en el circo glaciar (Estany del Mig y Estany Primer), la zona de salto de la crecida al pasar el umbral rocoso de los circos de Tristaina y zona de la presa de agua de la captación de los cañones de nieve de la estación de esquí.

Figura 2 - Localización de las estaciones



Zona de impacto: En primer lugar la capa de hielo de “l’Estany de Més Amunt” sobre el cuál impactó el alud presenta fracturas alineadas con bloques de hielo imbricados y una disposición concéntrica respecto al foco de impacto (estaciones 12, 13, 14, 15 y 16); a partir de la dirección que presentan las grietas en la capa de hielo y nieve de “l’Estany de Més Amunt”, se puede decir que los aludes que incidieron con más fuerza fueron los del sector del “Pic de l’Estany Forcat” (estación 16), que se sitúan a unos 300 metros del desagüe del lago. En segundo lugar se pudo observar que en las orillas del lago la nieve presenta escarpes abruptos (estación 14) así como la presencia de bloques de hielo situadas en las orillas a 3 metros por encima del lago (estación 12), que en algunos casos están impregnados con sedimentos del fondo del lago (estación 13). Se han podido observar estructuras de corriente (*ripples*) en la nieve de los bordes del sector de desguace del lago (de unos 15 m² de sección), situados a más de 3 metros del nivel del lago, que evidencian una importante avenida de agua (estación 12). Así pues, el impacto generó una ola de unos 3 metros que podría tener una longitud de onda decamétrica (≈ 20 m), a juzgar por la equidistancia existente entre las crestas de las grietas presentes en la capa de hielo del lago. El impacto de esta ola contra la orilla en el desagüe del lago generó una crecida. Esta avenida debió ser intermitente, y posiblemente fue ganando intensidad hasta llegar a un máximo para después volver a disminuir.

Zona de tránsito: En el cauce del río Tristaina que une los lagos, se han podido observar en diferentes lugares que la nieve está impregnada de sedimento, hecho que han permitido determinar el perímetro mojado de la crecida (10 m² en la estación 11 y 6,5 m² en la 10). En la confluencia del río de Tristaina con “l’Estany del Mig” (≈ 2285 m) se ha podido observar que la capa de hielo es más fina en el sector oriental del mismo, hecho que refleja el paso de la avenida (entre la estación 9 y 10) por encima de la capa de hielo. La crecida se extendió por el sector oriental del lago en dirección a la desembocadura. Nuevamente en el recorrido del río Tristaina de “l’Estany del Mig” hacia “l’Estany Primer” (≈ 2250 m) se han podido observar una sección con el perímetro mojado de la avenida (sección de 3,2 m² en la estación 9 y en la estación 8 una sección de 6,4 m²). En la confluencia del río Tristaina con “l’Estany Primer” se han podido observar estructuras tractivas y algunos bloques pequeños de nieve encima de la capa helada del lago en su sector oriental (estación 7), indicando que el agua de “l’Estany de Més Amunt” pasó por encima de ésta sin romperla, para canalizarse una vez más por el cauce del río Tristaina (estación 6).

Zona de salto: Esta zona se caracteriza por un cambio de pendiente muy abrupto (cascada, estación 5), donde el río Tristaina sobrepasa el umbral rocoso del circo glaciar para llegar al colector principal de la Coma del Forat en dirección a Arcalís. En este lugar se ha podido observar que el río Tristaina presentó un perímetro mojado superior al normal y se ha podido identificar la longitud máxima del impacto de la crecida al saltar por la cascada (estación 4), con un salto de unos 10 metros en horizontal por 13 metros en vertical. En el recorrido hacia la presa de agua se observan trazas de dos trayectorias de la avenida; la primera que no erosionó el manto de nieve y dejó un importante rastro de limos orgánicos, la segunda ha dejado un importante surco en la nieve y en el terreno. Ambas crecidas confluyeron pasando por el canal preexistente entre las rocas aborregadas por una sección de unos 6,7 m² (estación 3).

Zona de la presa: La presa de captación de aguas está situada a la salida de un pequeño canal formado entre dos rocas aborregadas glaciares. A la salida del canal se observó que la trayectoria de la avenida presentaba dos trayectorias, una por donde discurre actualmente el río y otra que no tuvo en cuenta el relieve existente, lo que indica que el flujo presentó dos caudales diferentes.

MODELO CONCEPTUAL Y TANTEO NUMÉRICO

A partir de los efectos observados se procede a continuación a elaborar el modelo conceptual de la crecida acontecida y se intenta cuantificar la magnitud del fenómeno.

Zona de impacto: Los hechos observados permiten hacer una primera aproximación de como podría ser la onda según un movimiento armónico simple: $Y(t,d) = A \cdot \sin 2\pi \cdot (t \cdot T^{-1} - d \cdot \lambda^{-1})$. Las variables son la amplitud de la onda ($A = 3$ m), la distancia al foco generador de ondas ($d \approx 300$ m, zona desagüe lago), el tiempo (t) como variable, la longitud de onda (λ) y el período (T). Estas dos últimas variables están relacionadas por la velocidad de traslación de la onda según la relación: $\lambda = v \cdot T$. En el contexto estudiado, la velocidad de traslación puede estar comprendida entre los 5 minutos ($v = 1$ m/s, $t = 300$ s) y el minuto ($t = 60$ s, $v = 5$ m/s), mientras que la longitud de onda se sabe que es decamétrica y como primera aproximación se podría suponer que es de 20 m. Con este primer tanteo el período variaría entre los 4 y 20 segundos; no obstante se deja para más adelante la determinación de estas tres variables.

Zona de tránsito: A partir del momento en que el lago desborda, la avenida de agua sigue las leyes de la dinámica y la velocidad que adquiere se puede asimilar a la caída libre de una masa puntual: $V_1 = \sqrt{2g \cdot h}$, donde (g) es la aceleración de la gravedad y (h) la altura de caída. No obstante es necesario hacer intervenir un coeficiente que reduzca la velocidad en cada tramo, por la pérdida de cantidad de movimiento de la crecida por la turbulencia del flujo y por el rozamiento con el perímetro del canal. Así pues se ha asimilado que la reducción de la cantidad de movimiento se produce por un choque inelástico a cada cambio de pendiente ($V_n^2 = e \cdot V_{n-1}^2$). El coeficiente de restitución (e) no es conocido pero sí la sección del perímetro mojado por donde ha pasado la avenida de agua, de forma que por todas ellas ha de haber pasado el mismo caudal, y éste, conocida la sección, es función de la velocidad ($Q_n = S_n \cdot V_n$). Conocidas las secciones de las estaciones 12, 11, 10, 9 y 8 se plantea un sistema de 5 ecuaciones con 6 incógnitas que no conllevan a una única solución de caudal y de velocidad, así que hay que tantear el valor del caudal de forma a obtener la velocidad en cada sección y calibrar el coeficiente de restitución según: $Q_n \cdot S_n^{-1} = e_n^{1/2} \cdot [(2g \cdot h_n)^{1/2} + V_{n-1}]$ Una vez planteado el sistema de ecuaciones y calibrado el coeficiente de restitución para “n” caudales en cada tramo del recorrido del río Tristaina, se obtienen “n” valores de la velocidad en la zona del salto de agua (estación 5), pero solo uno de estos valores puede generar que una masa puntual caiga por una cascada de 13 metros de altura e impactó a unos 10 metros de la zona de despegue.

Zona de salto: La máxima crecida del río Tristaina se identifica en la zona de salto por las trazas dejadas en la nieve más alejadas de la zona de despegue, que como ya se ha indicado se encuentran a unos 10 metros en horizontal por un salto de 13 metros. El flujo de agua describe una

trayectoria de caída desde la zona de despegue hasta la de impacto según la ecuación del tiro parabólico: $x_n = V_n^2 \cdot (2g)^{-1} \cdot \text{Sen } 2\alpha \cdot \{\sqrt{[1+2g \cdot h_n(V_n^2 \cdot \text{Sen}^2\alpha)^{-1}]} - 1\}$. La velocidad de despegue (V_n) que verifica la trayectoria observada del máximo salto de agua es de **8,42 m/s** (≈ 30 Km/h) e impacta con una velocidad de 19 m/s (≈ 68 Km/h). A partir de aquí se puede resolver la incógnita del caudal planteado con anterioridad, ya que se dispone del sistema de ecuaciones que relacionan la velocidad en cada tramo y el caudal de las secciones observadas, con todo el caudal instantáneo resultante es de **31 m³/s**. Con los valores del caudal y de la velocidad de impacto (24 m/s), suponiendo una densidad del agua igual a 1 T/m³, se halla una potencia de impacto por el salto de agua de unos **9.200 kW** en impactar en la nieve y el suelo.

Zona de la presa: En la zona de la presa se dispone de una nueva sección del perímetro mojado de inundación, que con los coeficientes de restitución obtenidos con anterioridad denotan que el caudal fue prácticamente el doble al encontrado en la zona de tránsito. Dado que la masa ni se crea ni se destruye uno se ha de invocar la suma de otro caudal. Teniendo en cuenta que la crecida del río Tristaina depende del desbordamiento de “l’Estany de Més Amunt”, y que este desbordamiento está en función del movimiento oscilatorio generado por el impacto del alud, se demuestra pues que la crecida en el río Tristaina fue intermitente. Como ya se comentó en el capítulo de efectos observados, entre la zona de salto y la presa de agua se observó que la crecida tomó dos trayectorias distintas, una es curvilínea y sigue el curso normal del río Tristaina, mientras que la otra acorta distancias siendo más rectilínea. Se ha procedido a calcular la velocidad del flujo en las dos trayectorias a partir de los coeficientes de restitución obtenidos en la zona de tránsito, y se ha obtenido un desfase de 10 segundos. Dado que el caudal obtenido en la presa es cercano al doble del obtenido en la zona de tránsito, se ha de suponer que crecidas de caudal similar se han interceptado cerca de la zona de la presa, que si están en fase generarían un caudal doble. Si se asume que se produjo una intercepción de ondas sucesivas en fase, el decalaje de 10 segundos se puede asimilar al período (T) de la onda.

Zona de impacto: Si la onda de impacto se asimila a un movimiento armónico simple, teniendo en cuenta un período de un ciclo cada 10 segundos (frecuencia igual a 0,1 Hz) y una longitud de onda $\lambda \approx 20$ m, la velocidad de traslación de la onda fue: $V = \lambda \cdot T^{-1}$, por lo que $V = 2$ m/s. De esta manera la ecuación de la onda producida en la zona de impacto pudo ser la siguiente:

$$Y(t,d) = A \cdot \sin 2\pi \cdot (t \cdot T^{-1} - d \cdot \lambda^{-1}) = 3 \cdot \sin 2\pi \cdot (t/10 - d/20)$$

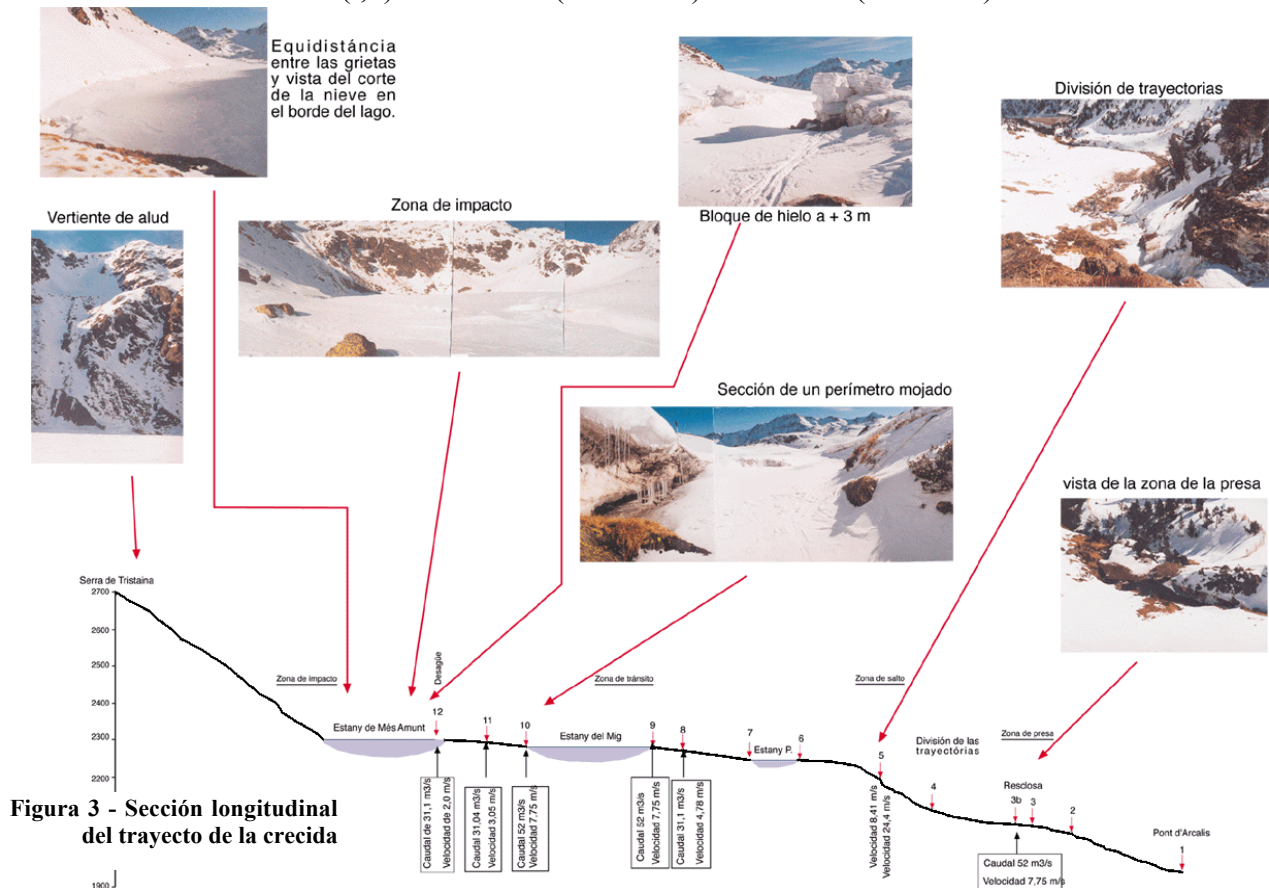


Figura 3 - Sección longitudinal del trayecto de la crecida

CONCLUSIONES

Hay que tener en cuenta que lo que se concluye a continuación está en función de la mayor o menor abundancia de datos observados y presentes en el lugar de los hechos, por lo tanto lo que aquí se concluye es únicamente una aproximación de lo que realmente debió ocurrir. Teniendo en cuenta esta advertencia se concluye que el impacto de un alud de nieve sobre la superficie helada de “l’Estany de Més Amunt” de Tristaina, produjo una onda que se comportó como si presentara un período de doce hercios con una longitud de onda de veinte metros, y avanzó hacia la orilla opuesta situada a unos trescientos metros, a una velocidad de unos siete kilómetros por hora, tardando unos dos minutos y medio en alcanzarla después del impacto. La onda produjo una ola de unos tres metros que desbordó el lago, produciendo una crecida en el río de Tristaina con un caudal instantáneo de treinta metros cúbicos por segundo. La ola produjo diferentes crecidas intermitentes que circularon por el cauce nevado del río y saltando al vacío con una velocidad de unos treinta kilómetros por hora en el cambio de pendiente que presenta el umbral del circo glaciar, impactando después de un salto de trece metros a una velocidad cercana a los ochenta y

cinco kilómetros por hora. El impacto tuvo una potencia de unos 9.200 kJ/s (9,2 mW), que erosionó el manto nival y el suelo existente dejando limpio el substrato rocoso y removiendo el lecho del río Tristaina. La intermitencia del desbordamiento del lago generó varias avenidas de agua que circularon con un decalaje de unos 10 segundos, y como mínimo dos de ellas confluyeron cerca de la presa al circular por trayectos distintos, y se generó cerca del doble del caudal de la crecida. El caudal sumado inundó los bordes del cauce del río Tristaina en el sector de la presa y escogió una trayectoria diferente al del curso normal del río.

BIBLIOGRAFIA

CEMAGREF, (1997) - Arcalís-Sorteny, 1:25.000, *Cartografia de localització probable d'allaus*, MI Govern d'Andorra (Ed.), Andorra.